BULLETIN
du MUSÉUM NATIONAL d'HISTOIRE NATURELLE

PUBLICATION BIMESTRIELLE

sciences de la terre

55

N° 396 JUILLET-AOUT 1976

BULLETIN
du
MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

57, rue Cuvier, 75005 Paris

Le *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle*, revue bimestrielle, paraît depuis 1895 et publie des travaux originaux relatifs aux diverses branches de la Science.

Les tomes 1 à 34 (1895-1928), constituant la 1re série, et les tomes 35 à 42 (1929-1970), constituant la 2e série, étaient formés de fascicules regroupant des articles divers.

A partir de 1971, le *Bulletin* 3e série est divisé en six sections (Zoologie — Botanique — Sciences de la Terre — Sciences de l'Homme — Sciences physico-chimiques — Écologie générale) et les articles paraissent, en principe, par fascicules séparés.

S'adresser :

— pour les **échanges**, à la Bibliothèque centrale du Muséum national d'Histoire naturelle, 38, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris (C.C.P., Paris 9062-62) ;

— pour les **abonnements** et les **achats au numéro**, à la Librairie du Muséum, 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris (C.C.P., Paris 17591-12 — Crédit Lyonnais, agence Y-425) ;

— pour tout ce qui concerne la **rédaction**, au Secrétariat du *Bulletin*, 57, rue Cuvier, 75005 Paris.

Abonnements pour l'année 1976

ABONNEMENT GÉNÉRAL : France, 530 F ; Étranger, 580 F.

ZOOLOGIE : France, 410 F ; Étranger, 450 F.

SCIENCES DE LA TERRE : France, 110 F ; Étranger, 120 F.

BOTANIQUE : France, 80 F ; Étranger, 90 F.

ÉCOLOGIE GÉNÉRALE : France, 70 F ; Étranger, 80 F.

SCIENCES PHYSICO-CHIMIQUES : France, 25 F ; Étranger, 30 F.

International Standard Serial Number (ISSN) : 0027-4070.

BULLETIN DU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
3e série, no 396, juillet-août 1976, Sciences de la Terre 55

Sédimentation dans l'océan Indien central
Les faciès associés aux nodules polymétalliques

par L. Leclaire, P. J. Giannesini, J. P. Caulet et M. Clocchiatti *

Résumé. — L'étude des échantillons récoltés au cours de la campagne Transindik, dans la zone équatoriale de l'océan Indien central, montre l'existence de trois types de dépôts bien distincts qui sont autant de faciès sédimentaires différents : les boues calcaires à Coccolithes et Foraminifères, les boues siliceuses à Diatomées et Radiolaires, encore appelées « diatomites brunes », les « boues rouges » à zéolithes, oxydes et palagonite.

Les boues calcaires sont d'âge très récent (Pleistocène supérieur et Holocène) et ne se trouvent que sur les structures élevées (dont la profondeur est inférieure à 4 000 m). L'âge des diatomites brunes va du Pleistocène inférieur à l'Holocène. Les boues rouges, pratiquement azoïques, n'ont pu être datées. Ces deux derniers faciès n'ont été rencontrés que dans le bassin Indien central, par des profondeurs supérieures à 4 000 m.

Les taux apparents de sédimentation des boues siliceuses sont très faibles : de l'ordre d'un à deux mètres par million d'années. Pourtant, des boues calcaires se déposent dans la même zone à des vitesses moyennes de l'ordre de dix à vingt mètres par million d'années. Par rapport à ces dépôts calcaires, les diatomites brunes du même âge sont disposées en séries d'épaisseur anormalement réduite, encore appelées « séries condensées ». Les restes de la microflore calcaire qui subsistent dans les diatomites brunes portent les traces d'une dissolution intense. Les très faibles teneurs en calcaire de ce faciès résulteraient d'une dissolution des Foraminifères et de la quasi-totalité des Coccolithes. Par ailleurs, la non représentation, dans certaines carottes, de plusieurs biozones du Quaternaire, laisse supposer que la série lithologique à diatomites brunes est interrompue par des hiatus ou de véritables lacunes stratigraphiques. Ces discontinuités sont attribuées, ici, à une érosion mécanique des dépôts par des courants de fond. La dissolution de la phase carbonatée et l'érosion intermittente des fonds seraient ainsi à l'origine du phénomène de « condensation », c'est-à-dire de réduction d'épaisseur, qui caractérise les diatomites brunes et aussi, très vraisemblablement, les boues rouges.

Les boues calcaires et les diatomites ont en commun — bien que dans des proportions différentes — une même fraction siliceuse (à Radiolaires, Diatomées, Silicoflagellés) qui est l'un des produits habituels de la sédimentation en zone équatoriale. Les diatomites brunes apparaissent ainsi, dans une certaine mesure, comme l'équivalent décarbonaté des boues calcaires et les boues rouges comme le résultat de la dissolution de la silice des diatomites. On pourrait donc considérer boues rouges et diatomites brunes comme des faciès résiduels. Cependant, ces sédiments ne sont pas uniquement des résidus de dissolution car ils renferment des minéraux et des substances authigènes : zéolithes, oxydes et produits silicatés ferrugineux, amorphes et très complexes. En première analyse, la concentration importante de ces paragenèses ne peut s'expliquer uniquement par la disparition d'un ou de deux constituants majeurs. En fait, ces faciès résiduels seraient aussi le siège d'une authigenèse non négligeable.

En conclusion, on ne peut manquer de constater que les concentrations de nodules polymétalliques observées au cours de la campagne Transindik se trouvent associées à ces faciès résiduels, disposés en séries condensées.

---

* *Laboratoire de Géologie du Muséum national d'Histoire naturelle, 43, rue de Buffon, 75005 Paris.*

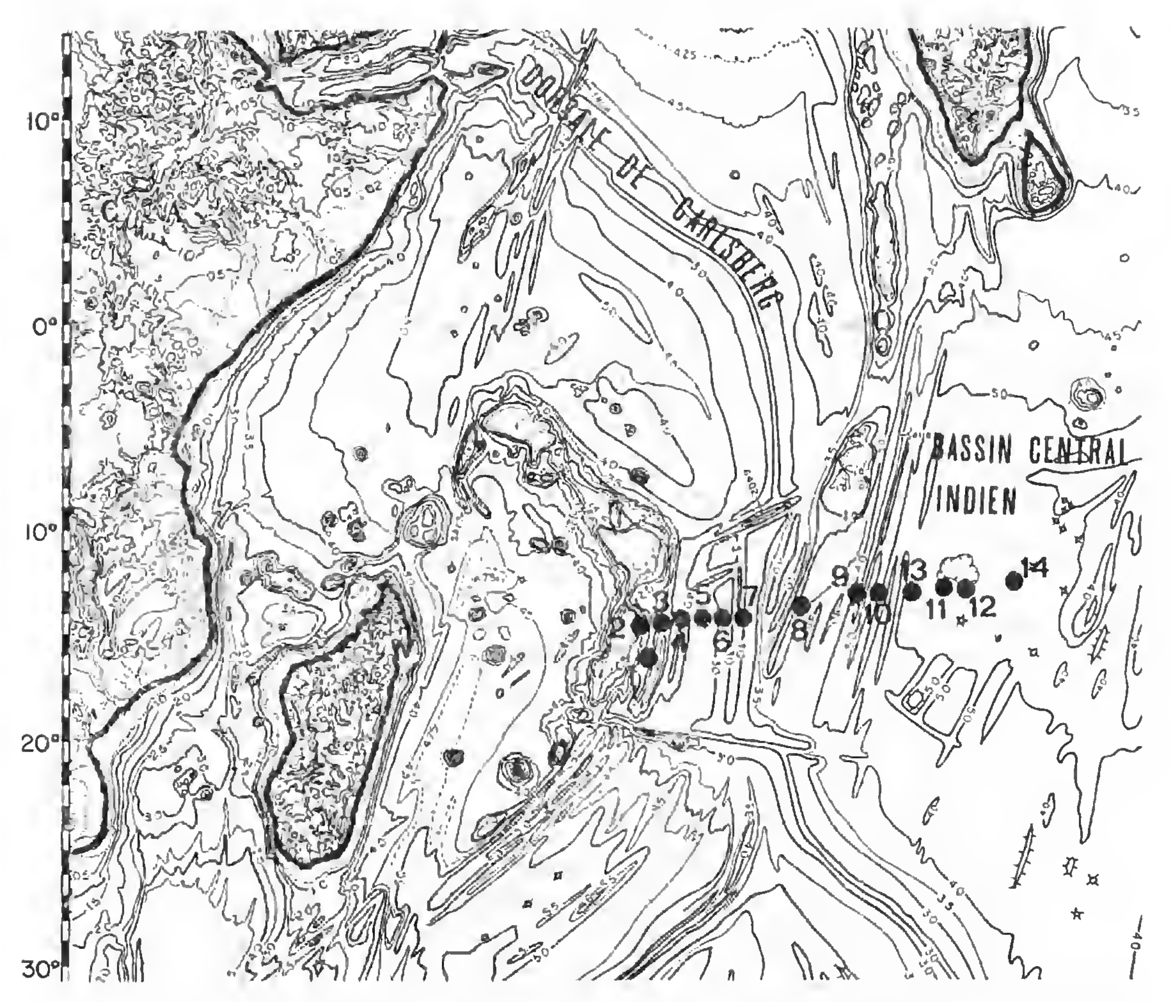


Fig. 1. — Localisation des stations : **1** : VA 07-44 ; **2** : VA 07-45 ; **3** : VA 07-46 ; **4** : VA 07-50 ; **5** : VA 07-55 ; **6** : VA 07-60 ; **7** : VA 07-69 ; **8** : VA 07-80 ; **9** : VA 07-84 ; **10** : VA 07-85 ; **11** : VA 07-98 ; **12** : VA 07-102 ; **13** : VA 07-94 ; **14** : VA 07-110.
Le fond de carte bathymétrique est de Heezen et Tharp (1965).

Introduction

Les matériaux étudiés ont été prélevés, dans l'océan Indien central, au cours de la campagne Transindik du navire « Valdivia » [1]. Cette campagne s'est déroulée du 14 décembre 1973 au 23 janvier 1974, entre Beira (Mozambique) et Singapour via Port-Louis (île Maurice).

1. Cette étude a été publiée avec l'accord du CNEXO et de Preussag. La 7e campagne Transindik du navire « Valdivia » a été entreprise sous l'égide du AMR et du Ministère de la Recherche et de la Technologie de la République Fédérale Allemande. Les échantillons ont été prélevés à bord par M. Y. Morel du COP (voir note nº COP/274 001) et nous ont été transmis par M. Lenoble (CNEXO) le 21 juin 1974.

Les prélèvements ont été effectués à l'occasion de 14 stations disposées selon un profil sensiblement Ouest-Est, qui suit approximativement le 15e parallèle (Sud) ; ce profil va du plateau des Mascareignes au bassin Indien central.

L'étude préliminaire présentée dans cette note a été réalisée dans le cadre des recherches concernant la genèse et la diagenèse des dépôts océaniques des zones centrale et australe de l'océan Indien (Laboratoire de Géologie du Muséum — RCP 212), et au titre de la convention CNEXO n° 74/1017. Les données recueillies constituent un premier complément aux résultats de la campagne Osiris (TAAF) concernant les relations entre morphostructure et sédimentation et, plus particulièrement, la nature et l'âge des dépôts associés aux concrétions métallifères.

I. MÉTHODOLOGIE

A. — Rappel des modes de prélèvement

Tous les prélèvements ont été effectués à l'aide de divers carottiers ne permettant pas une grande pénétration, le but étant l'obtention d'échantillons non perturbés de l'interface eau-sédiment. Les carottiers utilisés sont de trois types :

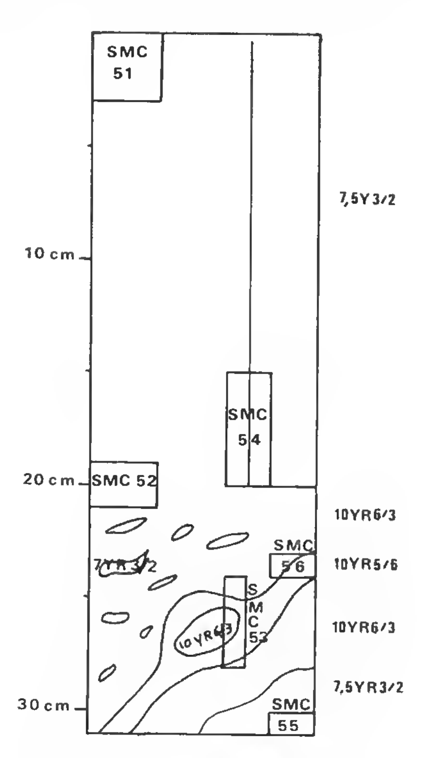


Fig. 2. — Disposition des échantillons SMC dans la carotte VA 07-85.

— *le carottier boîte* qui pénètre en moyenne de deux mètres et prélève des carottes de grande section : 30 × 30 cm ; son système d'obturation est du type à volets escamotables ;

— *le carottier Reinecke* qui est un carottier boîte de moindre pénétration (30 cm) et dont le système de fermeture est constitué par une pelle basculante qui sectionne la base de la carotte et, en outre, maintient en place la carotte lors de la remontée ;

— *le carottier à piston,* du type Kullenberg à piston double, dont la tête peut recevoir indifféremment les tubes cylindriques de petite section ou une boîte de grande section ; son déclenchement au fond est assuré par un petit carottier « tâteur », qui peut prélever 50 cm de carotte de petite section.

B. — Méthodes d'étude au laboratoire

L'étude au laboratoire a été précédée d'une description visuelle effectuée à bord, comportant une détermination des couleurs du sédiment (à l'aide de la « Rock Color Chart », voir fig. 2) et un repérage des structures sédimentaires.

1. Analyses lithologiques

Elles ont pour but la détermination de la nature et des proportions des constituants majeurs entrant dans la composition du sédiment, l'objectif final étant l'identification des principaux faciès sédimentaires.

Elles comportent des calcimétries — effectuées par volumétrie du CO_2 dégagé par attaque acide — d'une précision de l'ordre de 0,5 %. Les teneurs en $CaCO_3$ ainsi obtenues servent ensuite de repère pour les estimations des proportions des différents constituants, estimations qui dérivent d'une observation visuelle de frottis du sédiment au microscope optique. Si le besoin s'en fait sentir, des observations complémentaires sont menées au microscope électronique, couplé à un micro-analyseur (spectrométrie d'émission X).

La dénomination des matériaux étudiés résulte en partie de l'application d'une classification triangulaire du même type que celle de la figure 3, à partir des données de l'estimation quantitative évoquée précédemment. On précise ensuite en ajoutant le nom des minéraux ou des squelettes d'organismes dominants, exemple : boue calcaréo-siliceuse à Discoasters et Diatomées.

2. Stratigraphie

Elle a été établie à l'aide des échelles biostratigraphiques déjà existantes (tabl. I) et publiées (Berggren, 1972, 1973 ; Martini et Worsley, 1970 ; Petrushevskaya, 1972). Elle tient compte des observations récemment effectuées sur le matériel de la campagne Osiris (voir p. 259). Seules les échelles basées sur la nannoflore calcaire et les Radiolaires ont été utilisées ; la dissolution ou l'âge trop récent des dépôts n'ont pas permis d'appliquer simultanément l'échelle fondée sur les Foraminifères. L'âge des différentes limites de zones a été estimé en fonction des données publiées dans la littérature et d'après les résultats de l'étude de la carotte subéquatoriale MD 73 004. Cette carotte a permis de comparer

trois types de zonation du Quaternaire et de situer leurs limites par rapport aux « cycles » climatiques obtenus par analyse factorielle des populations de Foraminifères (SEGOUFIN et LECLAIRE, 1975).

La détermination des espèces résulte d'observations faites conjointement aux microscopes optique et électronique (MEB).

TABLEAU I. — Zonation stratigraphique du Pléistocène.

Etage		Age en m.a.	Zones à Foraminifères	Zones à nannoplancton calcaire	Zones à Radiolaires
PLEISTOCENE	SUPERIEUR	0	N 23 : zone à Pulleniatina obliquiloculata dextres et à rares Sphaeroidinella dehiscens	NN 21 : zone à Emiliana huxleyi	R1a : zone à Buccisnosphaera invaginata
	MOYEN	0,18		NN 20 : zone à Gephyrocapsa oceanica	R1b : zone à Collosphaera tuberosa
		0,40		NN 19 : zone à Pseudo-emiliana lacunosa	R2 : zone à Stylatractus universus
	INFERIEUR	0,70	N 22 : zone à Globorotalia truncatulinoides et à Sphaeroidinella dehiscens abondantes		
		1,1			R3 : zone à Lophophaena hispida
		1,6			R4 : zone à Pterocanium prismatium
		1,8			

II. CADRE MORPHOSTRUCTURAL

Les stations de prélèvement ont été réalisées le long d'un profil qui chevauche quatre structures principales caractérisant cette zone centrale de l'océan Indien (fig. 1).

On distingue d'Ouest en Est :

— La structure asécismique faillée du plateau des Mascareignes, qui se prolonge au Nord par les îles Seychelles et au Sud par les îles volcaniques de la Réunion et Maurice (stations VA 07-44, VA 07-45, VA 07-46) ; certaines parties de ce plateau ont dû être soumises à d'importants mouvements verticaux, comme semble en témoigner le fragment de réeif éocène arraché à l'île Agaléga, par 2 600 mètres de fond, pendant la campagne Osiris.

— La dorsale médio-indienne qui, plus au Nord, est encore appelée dorsale de Carlsberg, et qui se divise au Sud en deux branches au niveau de la zone fracturée de l'île Rodriguez (stations VA 07-50 et VA 07-55 sur le flanc occidental, station VA 07-60 sur le rift médian, station VA 07-69 sur le flanc oriental). La structure très complexe de cette dorsale à faible taux d'expansion est essentiellement caractérisée par une intense fracturation en relation avec le jeu de failles transformantes de direction NE-SW.

— L'extrémité sud de la ride asismique des Chagos-Laquédives (station VA 07-80), jalonnée de systèmes coralliens, qui serait une ancienne faille de transformation le long de laquelle le sous-continent indien aurait coulissé au cours de sa dérive vers le nord, pendant le Crétacé et le Paléogène (Mc Kenzie et Sclater, 1973). Par endroits, cette ride inactive se serait affaissée de plus de 2 000 m depuis le Paléocène (Whitmarsh, Weser *et al.*, 1973).

— Le bassin Indien central où les profondeurs avoisinent 5 000 m (stations VA 07-84 et VA 07-85 au pied de la ride des Chagos-Laquédives, stations VA 07-98, VA 07-102, VA 07-94 et VA 07-110 dans le centre du bassin). Selon Mc Kenzie et Sclater (1973), Sclater et Fischer (1974), les sédiments de la zone prospectée par le « Valdivia » reposeraient sur un plancher océanique d'âge vraisemblablement éocène, l'anomalie magnétique 23 ayant été repérée légèrement plus au Nord.

Rappelons que ce bassin a été créé par la subsidence du flanc nord-est de la dorsale est-indienne et que, par conséquent, il est le symétrique du bassin de Crozet.

En résumé, la campagne Transindik a recueilli des échantillons à la surface de sédiments situés, d'une part, sur des zones hautes (rides et dorsales centre-indiennes) dont la profondeur est comprise entre 2 500 et 3 500 m et, d'autre part, dans un bassin dont le fond est à plus de 4 500 m de profondeur.

III. NATURE ET ÂGE DES DÉPÔTS

A. — Étude systématique des prélèvements

Afin de faciliter, dans la mesure du possible, la lecture des données essentiellement descriptives concernant la composition et l'âge des matériaux recueillis, les résultats d'analyses joints à d'autres paramètres (localisation, couleur, etc.) ont été résumés sous la forme d'un tableau (tabl. II).

Le lecteur y trouvera donc tous les éléments lui permettant de situer géographiquement l'échantillon étudié, de même que la profondeur de prélèvement et la localisation de l'échantillon dans les carottes, avec référence à la numérotation codifiée propre à la campagne Transindik. Il pourra prendre connaissance de détails relatifs à la nature ou à l'âge des dépôts, données parfois fragmentaires qui ont été rassemblées dans la colonne « Observations ».

B. — Définition des principaux faciès sédimentaires

Les informations contenues dans le tableau II suffiraient, seules, à déterminer les principaux types de sédiments échantillonnés au cours de la campagne du « Valdivia ». Cependant, dans un souci de précision, les valeurs obtenues par l'estimation quantitative ont été reportées sur un diagramme triangulaire (fig. 3). Sur ce diagramme, les points représentatifs des échantillons analysés se regroupent très nettement en trois ensembles bien

TABLEAU II.

STATION	ECHANTILLON	COULEUR	% $CaCO_3$	LITHOLOGIE	AGE	OBSERVATIONS
VA 07-44 φ = 15°43 S G = 61°48 E Profondeur = 2.895 m	SMC 1 (0-10 cm)	10 YR 7/4	88,7	BOUE CALCAIRE	NN 21 < 0,18 m.a.	Boue calcaire à coccolithes et Foraminifères - Présence d'organismes siliceux (Diatomées, Radiolaires, spicules d'éponges, Silicoflagellés) et d'oxydes métalliques en micrograins. (Carottier *boîte*)
VA 07-45 φ = 14°29 S G = 61°22 E Profondeur = 2.971 m	SMC 2 (0-10 cm)	10 YR 7/2	89,2	BOUE CALCAIRE	NN 21 < 0,18 m.a.	La carotte est très homogène ; c'est une boue calcaire à coccolithes (55 à 60 %) et Foraminifères (25 à 30 %) avec organismes siliceux (≈ 5 % : Diatomées, Radiolaires, spicules d'éponges, Silicoflagellés) plus abondants vers le sommet. Les oxydes et parfois la palagonite sont présents sous forme de micrograins. Présence, au sommet de la carotte, d'un "coin" de 2 cm d'épaisseur, constitué par un matériel gris vert (5 Y 6/1) (Carottier *boîte*)
	SMC 3 (20-23 cm)	"	91,3			
	SMC 4 (30-33 cm)	"	92,8			
	SMC 5 (40-43 cm)	"	91,4			
	SMC 6 (50-53 cm)	"	91,1			
	SMC 7 (60-63 cm)	"	91,7			
	SMC 8 (70-73 cm)	"	91			
	SMC 9 (80-83 cm)	"	91,4			
	SMC 10 (90-93 cm)	"	92,8			
VA 07-46 φ = 14°20 S G = 62°17 E Profondeur = 3.724 m	SMC 11 (0-3 cm)	10 YR 6/4	82,5	BOUE CALCAIRE	NN 21 < 0,18 m.a.	Longueur de la carotte : 40 cm Carotte homogène : boue calcaire à coccolithes (60 à 70 %) et Foraminifères (15 à 25 %) avec organismes siliceux (5 à 10 % : Diatomées, Radiolaires, spicules d'éponges) plus abondants au sommet - Présence d'oxydes et de palagonite en micro-grains. Le sédiment renferme des espèces remaniées de la nannoflore de la zone NN 19 (SMC 12) et du Tertiaire supérieur (SMC 13) (Carottier *Reinecke*)
	SMC 12 (10-13 cm)	"	86,5			
	SMC 13 (20-23 cm)	"	88,2			
	SMC 14 (30-33 cm)	"	88,4			
VA 07-50 φ = 14°15 S G = 63°12 E Profondeur = 3.400 m	SMC 15 (0-3 cm)	10 YR 6/3	89,1	BOUE CALCAIRE	NN 21 < 0,18 m.a.	Carotte homogène : boue calcaire à coccolithes (60 à 70 %) et Foraminifères (20 à 30 %) avec organismes siliceux (≈ 5 %), oxydes et palagonite (?) en micro-granules (≈ 5 %). Cette station correspond à un petit bassin de 1 mille de large, situé au sommet d'un haut fond de 400 m, au dessus d'une plaine abyssale, à sédiments nettement stratifiés (sismique). Présence de nannofossiles remaniés de la zone NN 19 (dans SMC 17 et 18) et du Tertiaire Supérieur (dans SMC 15). (Carottier *Reinecke*)
	SMC 16 (10-13 cm)	"	88,1			
	SMC 17 (20-23 cm)	"	88			
	SMC 18 (30-33 cm)	"	89,1			

TABLEAU II (suite)

STATION	ECHANTILLON	COULEUR	% $CaCO_3$	LITHOLOGIE	AGE	OBSERVATIONS
VA 07-55 φ = 14°03 S G = 64°31 E Profondeur = 3.070 m	SMC 19 (0-3 cm)	10 YR 6/4	87,6	BOUE CALCAIRE	NN 21 < 0,18 m.a.	Carotte homogène : boue calcaire à coccolithes (≈ 60 %) et Foraminifères (≈ 30 %), avec présence d'organismes siliceux et d'oxydes en micro-granules. La topographie, peu accidentée, correspond à une pente douce en situation de piedmont. (Carottier *Reinecke*)
	SMC 20 (10-13 cm)	"	87,7			
	SMC 21 (20-23 cm)	"	88,3			
	SMC 22 (27-29 cm)	"	91,1			
VA 07-60 φ = 13°55 S G = 65°38 E Profondeur = 2.883 m (Rift médian)	SMC 30 (0-3 cm)	10 YR 6/3	87,2	BOUE CALCAIRE	NN 21 < 0,18 m.a.	Longueur de la carotte : 30 cm Carotte homogène : boue calcaire à coccolithes (55 %) et Foraminifères (25 à 30 %), avec organismes siliceux (≈ 5 % : Diatomées, Radiolaires, spicules d'éponges) et micro-granules d'oxydes et de palagonite (?) (< 5 %). (Carottier *Reinecke*)
	SMC 31 (10-13 cm)	"	86,6			
	SMC 32 (20-23 cm)	"	88,4			
VA 07-69 φ = 13°46 S G = 66°30 E Profondeur = 3.856 m	SMC 33 (32-40 cm)	10 YR 7/3	86,7	BOUE CALCAIRE	NN 21 < 0,18 m.a.	Longueur de la carotte : 1,50 m Carotte homogène : boue calcaire à coccolithes (60 à 65 %) et Foraminifères (25 à 30 %) ; présence d'organismes siliceux (principalement Diatomées) et d'oxydes en micro-granules. Remaniements de coccolithes provenant du Néogène et du Quaternaire inférieur (NN 19). (Carottier *piston*)
	SMC 34 (40-50 cm)	10 YR 8/2	87,3			
	SMC 35 (55-60 cm)	10 YR 7/3	89,9			
	SMC 36 (71-76 cm)	"	90,3			
	SMC 37 (81-86 cm)	10 YR 7/2	89,1			
	SMC 38 (92-97 cm)	10 YR 7/3	86,6			
	SMC 39 (120-130 cm)	"	88,7			
	SMC 40 (130-140 cm)	"	90,1			
VA 07-80 φ = 13°16 S G = 69°31 E Profondeur = 3.382 m	SMC 41 (0-3 cm)	10 YR 7/3	88,9	BOUE CALCAIRE	NN 21 < 0,18 m.a.	Boue calcaire homogène à coccolithes (55 à 65 %) et Foraminifères (25 à 30 %), avec organismes siliceux (≈ 5 % : Diatomées, Radiolaires). Présence de Quaternaire inférieur (NN 19) remanié dans SMC 42 et SMC 44. (Carottier *Reinecke*)
	SMC 42 (10-13 cm)	"	89,4			
	SMC 43 (20-23 cm)	"	86,8			
	SMC 44 (30-32 cm)	"	91,2			

Tableau II (suite)

STATION	ECHANTILLON	COULEUR	% $CaCO_3$	LITHOLOGIE	AGE	OBSERVATIONS
VA 07-84 φ = 12°54 S G = 72°24 E Profondeur = 4.935 m	SMC 45 (0-3 cm)	5 YR 3/4	12,3	DIATOMITE	NN 21 R 1 a	"Diatomite brune" à Radiolaires, avec débris de Foraminifères et de coccolithes ; présence de verre volcanique, d'oxydes et de palagonite en micro-granules (≈ 10 %).
	SMC 46 (3-9 cm)	"	17,5	BRUNE	< 0,18 m.a.	Remaniements de microfaune et microflore provenant de dépôts d'âge néogène et quaternaire inférieur (NN 19 R 2)
	SMC 47 (10-11 cm)	5 YR 3/3	≈ 0	BOUE	?	"Boue rouge" à palagonite et zéolithes (phillipsite), avec quelques fragments d'organismes siliceux dans SMC 48.
	SMC 48 (11-13 cm)	"	"	ROUGE		(Carottier *Reinecke*)
	SMC 49 (20-22 cm)	"	"			
	SMC 50 (30-32 cm)	"	"			
VA 07-85 φ = 12°42 S G = 73°10 E Profondeur = 5.038 m (Voir fig. 2)						Verre volcanique avec figures de corrosion tout au long de la carotte.
	SMC 51 (0-3 cm)	5 YR 3/4 c.r. (°)	15,1	DIATOMITE		Boue brune à Diatomées (30 à 50 %) et Radiolaires (≈ 25 %), à débris de Foraminifères, avec granules d'oxydes et de palagonite (≈ 20 % pour SMC 51).
	SMC 52 (19-21 cm)	10 YR 5/4 c.r. (°)	≈ 5	BRUNE	NN 21	Remaniements NN 19 et Tertiaire supérieur pour SMC 51 et R 2 pour SMC 52.
	SMC 53 (24-28 cm)	10 YR 7/4 bariolé c.r. (°)	≈ 5	DIATOMITE BEIGE	R 1 a	Boue beige à Diatomées (55 %) et Radiolaires (25 %), avec quelques débris de Foraminifères et présence de micro-granules d'oxydes et de palagonite. Radiolaires remaniés de R 2
	SMC 54 (15-20 cm)	entre 5 YR 4/4 et 5 YR 3/4 c.r. (°)	≈ 10	DIATOMITE	< 0,18 m.a.	Boue brune à Diatomées (45 à 50 %) et Radiolaires (15 à 25 %) avec fragments de Foraminifères ; présence d'oxydes et de palagonite en micro-grains.
	SMC 55 (30-31 cm)		≈ 5	BRUNE	R 1 b (?)	Radiolaires de R 2 et R 3 remaniés.
	SMC 56 (23-24 cm)	10 YR 6/6 (°) code réduit	≈ 10	DIATOMITE BEIGE	NN 21 ou NN 20 ?	Boue beige à Diatomées (≈ 35 %) et Radiolaires (30 %), avec débris de Foraminifères. (Carottier *Reinecke*)

Tableau II (*fin*)

STATION	ECHANTILLON	COULEUR	% $CaCO_3$	LITHOLOGIE	AGE	OBSERVATIONS
VA 07-98 φ = 12°20 S G = 76°35 E Profondeur = 5.377 m (Bassin central Indien)	SMC 57 (0-1 cm) SMC 58 (3-5 cm) SMC 59 (10-13 cm) SMC 60 (19-22 cm) SMC 61 (30-32 cm)	7,5 YR 3/2 " " " "	≃ 0 " " " "	DIATOMITE BRUNE	R 1 a < 0,18 m.a. ~~~~~~ R 2 > 0,4 m.a.	Boue brune à Diatomées (55 à 60 %) et Radiolaires (15 à 25 %), peu homogène, contenant des micro-nodules (surtout abondants vers le sommet) et de la palagonite en micro-granules. Verre volcanique présent, ainsi que des débris de discoasters à partir de 10 cm. (Carottier *Reinecke*)
VA 07-102 φ = 12°17 S G = 77°08 E Profondeur = 5.181 M (Bassin central Indien)	SMC 62 (0-10 cm)	7,5 YR 4/2	0,8	DIATOMITE BRUNE	~~~~~~ R 3 > 1,1 m.a.	Boue brune à Diatomées (50 %) et Radiolaires (25 %), contenant quelques débris de Foraminifères, des éléments détritiques (quartz, feldspaths), des micro-nodules et de la palagonite. (Carottier *Reinecke*)
VA 07-94 φ = 12°27 S G = 75°01 E Profondeur = 5.148 m (Bassin central Indien)	SMC 63 (5-10 cm) SMC 64 (45-50 cm) SMC 65 (88-92 cm) SMC 66 (100-105 cm) SMC 67 (145-150 cm) SMC 68 (160-165 cm) SMC 69 (185-190 cm)	5 YR 4/4 c.r. (°) 5 YR 4/4 bariolé 10 YR 6/6 et 5 YR 4/4 bariolé 5 YR 3/4 " 10 YR 5/4 5 YR 3/4	0,4 0 " " " " "	DIATOMITE BRUNE	R 2 > 0,4 m.a. ~~~?~~~ R 3 > 1,1 m.a.	Boue brune homogène, avec des passées plus claires (SMC 68), parfois bariolée (SMC 64, 65, 67), à Diatomées et Radiolaires (≃ 25 %). Présence de verre volcanique, de palagonite et d'oxydes (ces deux derniers plus abondants vers la base : SMC 69). Présence de débris de discoasters en voie de dissolution et apparition de quelques petits rhomboèdres de carbonates. Longueur de la carotte : 2,30 m (Carottier *Reinecke*)
VA 07-110 φ = 12°00 S G = 79°17 E Profondeur = 5.397 m	SMC 70 (0-3 cm) SMC 71 (10-13 cm) SMC 72 (20-23 cm) SMC 73. (30-32 cm)	7,5 YR 3/2 avec traces 10 YR 5/2 10 YR 3/2 avec marbrures 10 YR 6/6 " " (°) code réduit	0 " " "	DIATOMITE BRUNE MARBREE	R 1 a	Boue brune peu homogène (marbrures) à Diatomées (45 à 55 %) et Radiolaires (25 à 35 %), avec verre volcanique et oxydes. Présence de carbonates rhomboédriques (dolomie ?) (Carottier *Reinecke*)

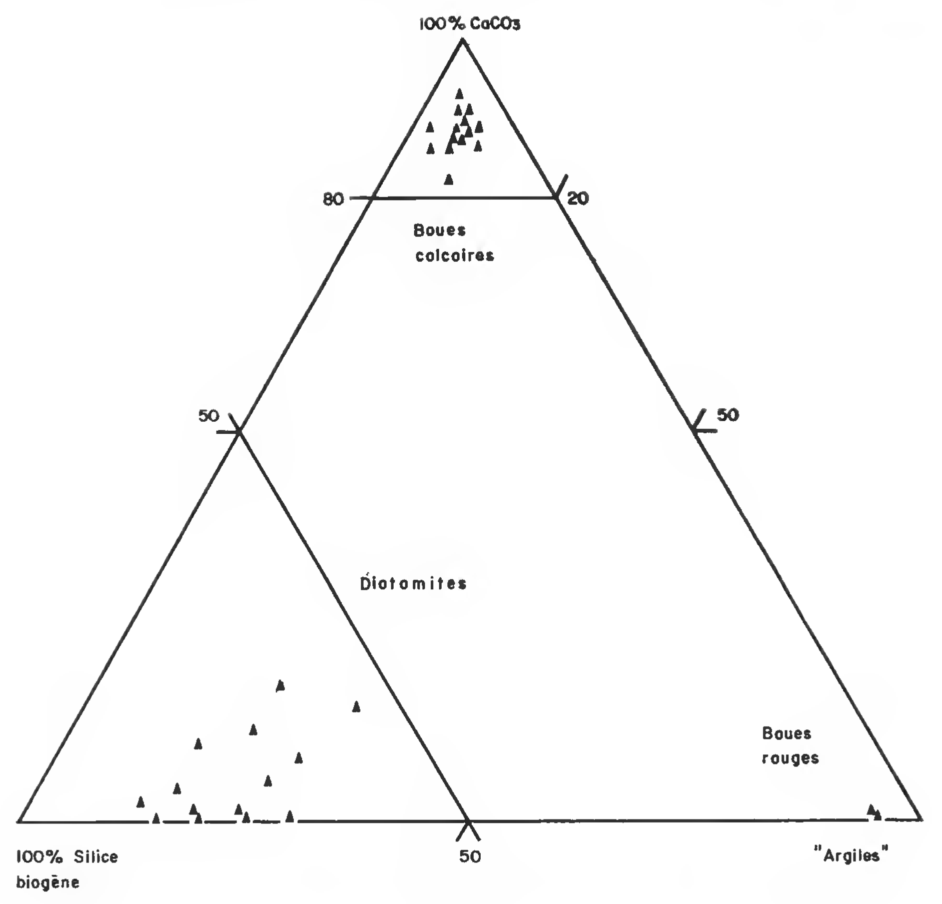


FIG. 3. — Importance relative des constituants majeurs des échantillons SMC.

distincts qu'on peut aisément délimiter et qui correspondent, en définitive, à trois faciès sédimentaires différents :

— *Les boues calcaires à Coccolithes et Foraminifères* : Leurs teneurs en carbonate de calcium sont, en moyenne, voisines de 90 %. Les Coccolithes entrent pour 50 à 60 % dans la composition du sédiment total et les Foraminifères en constituent 20 à 30 % (en poids). La fraction siliceuse formée par les Diatomées et les Radiolaires n'est pas négligeable et représenterait de 5 à 10 % du sédiment brut. Ce faciès n'est pas totalement dépourvu d'oxydes, qui se présentent généralement en micro-granules. Des traces de palagonite ont aussi été observées. Les remaniements de microfaune et de microflore sont fréquents et traduisent, vraisemblablement, des phénomènes de redéposition.

— *Les boues siliceuses à Diatomées et Radiolaires* : Il s'agit d'un dépôt composé de 50 à 60 % de Diatomées, 15 à 30 % de Radiolaires et contenant aussi des spicules d'éponges et des Silicoflagellés. Ce sédiment est fortement coloré en brun-rouge, très vraisemblablement par des oxydes métalliques présents en micro-granules et sous la forme d'amas de

nature complexe. On y trouve de la palagonite et du verre volcanique sous forme d'éclats qui montrent parfois des figures de corrosion. Les zéolithes y sont relativement abondantes. Ces diatomites renferment, par place, des enclaves souvent de couleur plus claire, caractérisées par la présence d'une fraction carbonatée (15 % maximum de $CaCO_3$) constituée par des débris de Foraminifères, des Coccolithes et des Discoasters en voie de dissolution. Les micro-nodules de manganèse sont abondants dans ce sédiment. Des nodules d'une taille atteignant le centimètre ont aussi été observés, notamment en surface.

— *Les boues rouges à zéolithes* : Encore improprement appelées « argiles rouges », elles ne sont représentées que dans la carotte VA 07-84, où elles sont recouvertes d'une mince couche de diatomites brunes. Leur composition est difficile, sinon impossible, à déterminer par simple observation au microscope optique. Cependant, on peut observer que dans un fond de nature vraisemblablement argileuse (mais à silicates amorphes ou très mal cristallisés) se trouve de la palagonite abondante sous forme de fragments plus ou moins dévitrifiés dans lesquels l'argile commence à apparaître. De plus, au contact immédiat de ces fragments, on observe fréquemment des minéraux zéolithiques (phillipsite) en longues baguettes parfois mâclées, dont les faces cristallines apparaissent corrodées. Ces zéolithes constituent parfois plus de 50 % du sédiment total. Les micro-nodules sont aussi très abondants (jusqu'à 20 %) et forment l'un des éléments caractéristiques de ce faciès. De plus, on observe de rares éléments détritiques comme du quartz et des feldspaths.

C. — Nannoflore et microfaune

1. La nannoflore calcaire

a — *Age*

L'étude des nannofossiles calcaires a permis la datation des boues calcaires et de quelques niveaux des diatomites brunes. La zonation adoptée est celle proposée par Martini et Worsley (1970) (tabl. 1) ; l'âge des limites des zones a été réajusté en tenant compte des résultats de l'étude de la carotte MD 73 004 (campagne Osiris, 1973).

Les Coccolithes contenus dans les carottes de la campagne Transiodik sont essentiellement d'âge quaternaire récent. L'espèce caractéristique de la zone NN 21, *Emiliania huxleyi*, a toujours été observée. Les sédiments ont donc été déposés depuis moins de 180 000 ans environ.

b — *Remaniements*

Des remaniements de nannoflore calcaire ont été observés dans toutes les carottes se situant au-delà de 3 070 m. Les formes remaniées proviennent soit du Quaternaire ancien (zones : NN 20, NN 19), soit du Néogène (zones : NN 18 à NN 14). Ces formes sont cependant bien conservées.

c — *Dissolution*

Le problème de l'abondance des nannofossiles calcaires observés et celui de leur état de conservation sont étroitement liés dans le cas des matériaux étudiés. Dans toutes les

carottes situées à une profondeur inférieure à 4 000 m, la nannoflore est très abondante et bien conservée. Deux carottes, VA 07-84 et VA 07-85, renferment une nannoflore raréfiée et en voie de dissolution : elles ont été prélevées à des profondeurs respectives de 4 935 et 5 038 m. Il y subsiste encore un certain nombre d'espèces déterminables comme *Emiliania huxleyi* (pl. II, 2), *Gephyrocapsa oceanica* (pl. II, 1 b-c), *Pseudoemiliania lacunosa*, *Ceratolithus cristatus*, *Cyclococcolithus leptoporus* (pl. II, 3 b) et de nombreux Discoasters remaniés qui semblent particulièrement résistants à la dissolution. Ces observations rejoignent celles de Mc Intyre et Mc Intyre (1971), qui ont noté l'apparition des traces de dissolution de la nannoflore vers 4 000 m et sa réduction à l'état de débris non déterminables à partir de 5 400 m environ.

2. **Les Foraminifères planctoniques**

L'étude des Foraminifères planctoniques contenus dans les sédiments prélevés au cours de cette campagne se situe dans le cadre d'une analyse de la répartition des espèces en fonction de la latitude, des grands courants géostrophiques et des discontinuités hydrologiques de l'océan Indien central.

Cette analyse, qui ne fait que débuter, sera conduite parallèlement aux recherches des modifications du paléo-environnement par le traitement mathématique des populations de Foraminifères planctoniques (Segoufin et Leclaire, 1975).

Les Foraminifères planctoniques ne sont, ici, d'aucune utilité pour la stratigraphie des carottes, en raison de l'âge trop récent des dépôts ou de la dissolution. Tous les dépôts calcaires recueillis sont caractérisés par la présence des espèces de la zone N 23 (*Globigerina calida*, rares *Sphaeroidinella dehiscens* et *Pulleniatina* dextres dominantes). Les sédiments (base de VA 07-98, VA 07-102, VA 07-94) dont l'âge a été estimé, par ailleurs, à plus de 700 000 ans (limite inférieure de la zone N 23, selon Berggren, 1974) ne contiennent pas de Foraminifères.

Les premiers résultats de cette analyse micropaléontologique portent sur la composition de la microfaune de Foraminifères dont la taille est supérieure à 175 µ. L'exemple présenté dans le tableau III montre, à l'évidence, l'influence nette de la zone équatoriale sur la sédimentation. Les Globigerinoïdes, avec notamment *G. sacculifer* et *G. ruber*, sont abondants et accompagnés de *Globorotalia menardii*, *Pulleniatina obliquiloculata* et *finalis*, et de *Globoquadrina conglomerata*. L'ensemble des Foraminifères planctoniques représente de 20 à 30 % du sédiment total. Les espèces benthiques sont très rares ou absentes.

Le problème de l'influence indirecte de la profondeur sur la composition de ces thanatocénoses a été abordé (tabl. IV). Bien que le nombre d'échantillons étudiés (sommet des carottes) soit restreint, on peut considérer, en première analyse, que la variation des proportions relatives des espèces résistantes à la dissolution — essentiellement *G. menardii* et *Pulleniatina obliquiloculata* (Parker et Berger, 1971) — est significative. Il apparaîtrait donc que l'importance des formes résistantes augmente légèrement avec la profondeur et que le phénomène de dissolution sélective commence à se faire sentir dès les profondeurs de l'ordre de 3 500 m (Lysocline de Berger, ?).

Interprétation

Si l'on compare ces résultats avec ceux provenant de l'étude partielle des carottes MD 73004 et MD 73005 (campagne Osiris, 1973) prélevées par 5° de latitude Sud environ,

TABLEAU III. — Exemple de la composition spécifique de la microfaune de Foraminifères (échantillon SMC 30) entrant dans la constitution des boues calcaires. Les Foraminifères ont été extraits à l'aide de tamis à maille de 175 et 400 μ.

Nom des espèces rencontrées	Pourcentages relatifs
Globigerinoides ruber (A)	6,6
Globigerinoides ruber (B)	19,1
Globigerinoides sacculifer	17,7
Globigerinoides trilobus	4,9
Globigerinoides conglobatus	5,2
Globorotalia truncatulinoides (D)	0,1
Globorotalia truncatulinoides (G)	0,2
Globorotalia menardii (s.l.)	5,6
Globorotalia scitula	0,8
Globoquadrina dutertrei	9,0
Globoquadrina hexagona	1,9
Globoquadrina conglomerata	0,5
Globigerina pachyderma (D)	0,2
Globigerina calida	1,1
Globigerinita glutinata	5,1
Globigerina bulloides	1,1
Orbulina universa	2,1
Pulleniatina obliquiloculata	5,7
Pulleniatina finalis	0,6
Sphaeroidinella dehiscens	0,6
Hastigerinella aequilateralis	11,6

TABLEAU IV. — Variations relatives des groupes d'espèces résistantes et moins résistantes à la dissolution, en fonction de la profondeur, dans les échantillons de surface (sommets des carottes).

Echantillons	Importance relative des deux groupes (%)		Profondeur en mètres
	espèces résistantes	espèces moins résistantes	
SMC 30	13,8	86,2	2 883
SMC 02	11,1	88,9	2 971
SMC 19	13,8	86,2	3 070
SMC 41	14,1	85,9	3 382
SMC 15	15,0	85,0	3 400
SMC 11	16,5	83,5	3 724
SMC 33	16,1	83,9	3.856

on s'aperçoit qu'à profondeur égale, la composition des thanatocénoses de Foraminifères planctoniques est sensiblement différente. Dans ces deux carottes, les espèces résistantes à la dissolution sont plus abondantes ; leur teneur moyenne, de l'ordre de 25 à 30 %, peut atteindre 50 % et plus dans les niveaux anciens. Par ailleurs, la microfaune la plus typiquement équatoriale, celle qui est apparemment la moins affectée par la dissolution sélective, se trouve dans les échantillons de la campagne Transindik, sous des latitudes de l'ordre de 15° Sud.

Si l'on admet avec Olausson (1971) que la productivité de la zone tropicale est maximum au niveau des divergences équatoriales et notamment aux abords de la divergence sud-équatoriale, on peut penser que les effets de la dissolution à la verticale de cette discontinuité hydrologique sont plus modérés qu'ailleurs. Dans cette hypothèse, et compte tenu des résultats sommairement exposés ci-dessus, l'équateur hydrologique de l'océan Indien central serait plus proche de 15° de latitude Sud que de l'équateur géographique. Cette supposition est en accord avec l'hypothèse d'Olausson (1971) qui, dans la même région, situe l'équateur hydrologique approximativement entre 8 et 12° de latitude Sud. Le déplacement de cette discontinuité hydrologique au cours du Quaternaire et du Pliocène supérieur fait l'objet d'une étude en cours.

3. Les Radiolaires et la datation des diatomites brunes

Plusieurs échelles stratigraphiques selon les Radiolaires ont été proposées pour différentes latitudes et régions. La plus élaborée concerne la zone tropicale de l'océan Pacifique (Riedel et Sanfilippo, 1970). Mais on peut l'utiliser pour les sédiments de l'océan Indien car les populations sont à peu près semblables. Le seul inconvénient de cette échelle tient au fait que le Quaternaire n'y est pas découpé en plusieurs zones. Seule la limite Plio-Pleistocène est bien marquée par l'extinction de *Pterocanium prismatium.*

Pour combler cette lacune, trois spécialistes ont récemment recherché si on pouvait définir plusieurs niveaux à Radiolaires dans le Quaternaire. Le premier, J. Hays (1965), découpe le Quaternaire en trois zones qu'il rattache aux variations du champ magnétique. Mais, son échelle n'est valable que pour les hautes latitudes. Dans les sédiments pleistocènes du Pacifique équatorial, C. Nigrini (1971) définit quatre zones, mais sans dater les limites de ces zones. Plus récemment, M. Petrushevskaya (1972) propose un autre découpage du Pleistocène pour les sédiments récents de l'océan Indien. Elle rejoint les conclusions de Hays pour fixer, toujours par le paléomagnétisme, l'extinction de *Stylatractus universus* (pl. I, 3) à environ 400 000 ans. Elle propose ainsi trois zones à Radiolaires pour la zone sub-tropicale :

— zone I : 0 à 0,4 m.a. (million d'années),
— zone II : 0,4 m.a. à 1 ou 1,1 m.a.,
— zone III : 1,1 m.a. à 1,6 m.a.

La limite entre la zone I et la zone II est définie par l'extinction de *Stylatractus universus.* La limite entre les zones II et III est marquée par l'extinction de *Pterocorys campanula* (pl. I, 4) et l'apparition de *Pterocorys hertwigii.* La base de la zone III et le passage au Pliocène se marquent par l'extinction de *P. prismatium* et l'apparition de *Lophophaena hispida.*

L'examen en cours du matériel prélevé dans l'océan Indien lors de la campagne Osiris (1973) permet de compléter les observations précédentes, du moins pour la zone sub-tropicale, ce qui est justement le cas des matériaux examinés ici.

L'échelle « Radiolaires » obtenue a été testée par rapport à celle des Foraminifères et des Coccolithes. Ces premiers résultats permettent de dater avec une assez bonne approximation les diatomites brunes récoltées par le navire « Valdivia ».

L'échelle adoptée est la suivante :

— zone R 1 a : de 0 à 0,175 m.a., zone à *Buccinosphaeara invaginata* (pl. 1, 2)
— zone R 1 b : de 0,175 à 0,4 m.a., zone à *Collosphaeara tuberosa* (pl. 1, 6)
— zone R 2 : de 0,4 à 1,1 m.a., zone à *Stylatractus universus*
— zone R 3 : de 1,1 à 1,6 m.a., zone à *Lophophaena hispida*

Les zones R 1 a et R 1 b correspondraient approximativement aux zones NN 21 et NN 20 de l'échelle biostratigraphique établie grâce aux nannofossiles calcaires.

IV. PHÉNOMÈNES SÉDIMENTAIRES OBSERVÉS

A. — Répartition géographique des faciès sédimentaires

Du point de vue de la nature des sédiments déposés, le profil Transindik met en évidence deux zones géographiques bien distinctes dans cette partie de l'océan Indien central (fig. 1, 6 et 7).

La région occidentale, caractérisée par la présence du plateau des Mascareignes, de la dorsale médio-indienne et du prolongement de la ride des Chagos-Laquédives, semble recouverte de boues calcaires qui sont le produit typique de la sédimentation pélagique, en zone équatoriale, pendant le Quaternaire récent.

La région orientale, constituée par le fond du bassin Indien central, serait tapissée de boues siliceuses ou « diatomites brunes ». En bordure du bassin, au pied du prolongement de la ride des Chagos-Laquédives, les influences d'une sédimentation calcaire se font encore sentir.

Des boues rouges à zéolithes n'ont été observées qu'à la station VA 07-84, sous une pellicule de diatomite (10 cm) très faiblement calcaire.

Ces deux régions diffèrent aussi par leur profondeur moyenne : dans la première, les fonds se trouvent entre 2 500 et 4 000 m environ, alors que dans la seconde ils se situent à plus de 5 000 m en moyenne. Il apparaît donc que la nature des sédiments déposés dans cette partie de l'océan Indien central est étroitement dépendante de la profondeur. La sédimentation pélagique y serait ainsi directement contrôlée par les morphostructures.

La présence de boues rouges sous une couverture de diatomites, phénomène apparemment très localisé, laisse cependant supposer des variations verticales de faciès, c'est-à-dire des modifications de la sédimentation au cours du temps.

B. — Dissolution du calcaire

Le diagramme de la figure 4 montre la répartition des teneurs en carbonate de calcium des sédiments de la surface (sommet des carottes) en fonction de la profondeur ; la figure 5 illustre la distribution de ces teneurs le long du profil bathymétrique.

A des profondeurs supérieures à 5 100 m environ, les sédiments (diatomites brunes) sont totalement dépourvus de calcaire. Vers 5 000 m, la fraction carbonatée qui subsiste est constituée par des débris de Foraminifères planctoniques (*G. menardii*) et par des Coccolithes fortement corrodés. Ainsi, le « pont » de *Gephyrocapsa oceanica* (pl. II, 1 b-c) a disparu et il y a fragmentation du disque proximal de *C. leptoporus* (pl. II, 3 b), etc.

Il est évident que cette corrosion ne peut avoir pour origine qu'une dissolution des carbonates par les eaux de fond, phénomène qui est certainement la cause de la « décalcification » totale des sédiments de fond de bassin.

S'il est relativement aisé de déterminer la profondeur à laquelle cette décarbonatation est totale (environ 5 100 m), il est plus difficile de localiser la profondeur où commence la dissolution.

L'analyse de la composition des thanatocénoses de Foraminifères planctoniques (voir p. 253) semble indiquer que les premiers effets de la dissolution seraient perceptibles dès 3 400 m de profondeur. Ce premier résultat, qu'il sera nécessaire de confirmer par d'autres analyses, laisse penser qu'à partir de cette profondeur, la dissolution du carbonate de calcium a lieu au contact d'une tranche d'eau de 1 700 à 2 000 m d'épaisseur.

Ainsi, ce que l'on appelle habituellement la profondeur de dissolution des carbonates (matérialisée dans le cas présent sur la figure 4), et qui correspond à la « carbonate compen-

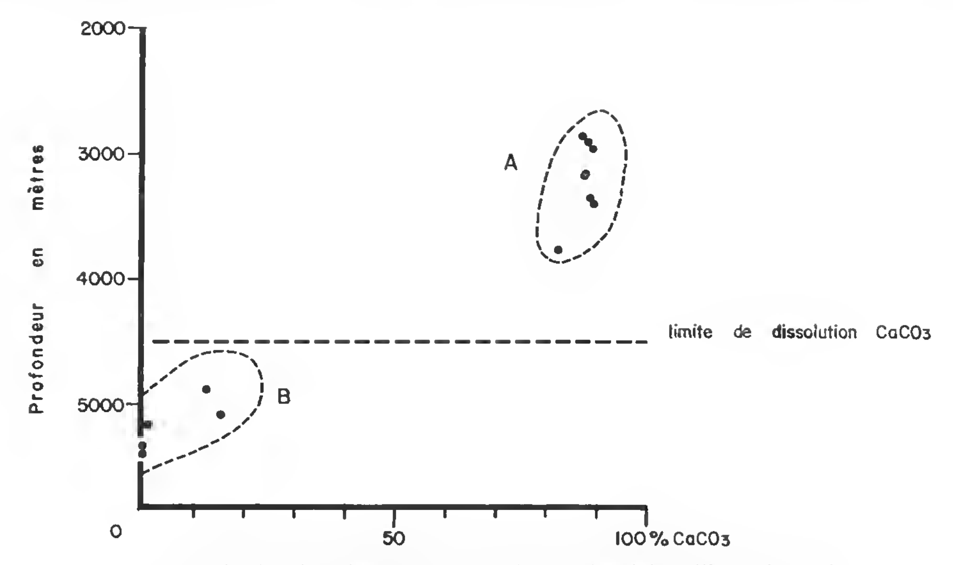


Fig. 4. — Distribution des teneurs en $CaCO_3$ des échantillons de surface.
A : boues calcaires ; B : diatomites et boues rouges.

VA07-45
07-44
07-46
07-50
07-55
07-60
07-69
07-80
07-84
07-85
07-94
07-98
07-102
07-110
% CaCO3
100
50
0
Profondeur en m.
3000
4000
5000
limite de dissolution CaCO3
200
400
600
800
distance (milles)

Fig. 5. — Répartition des teneurs en $CaCO_3$ des échantillons de surface le long du profil bathymétrique.

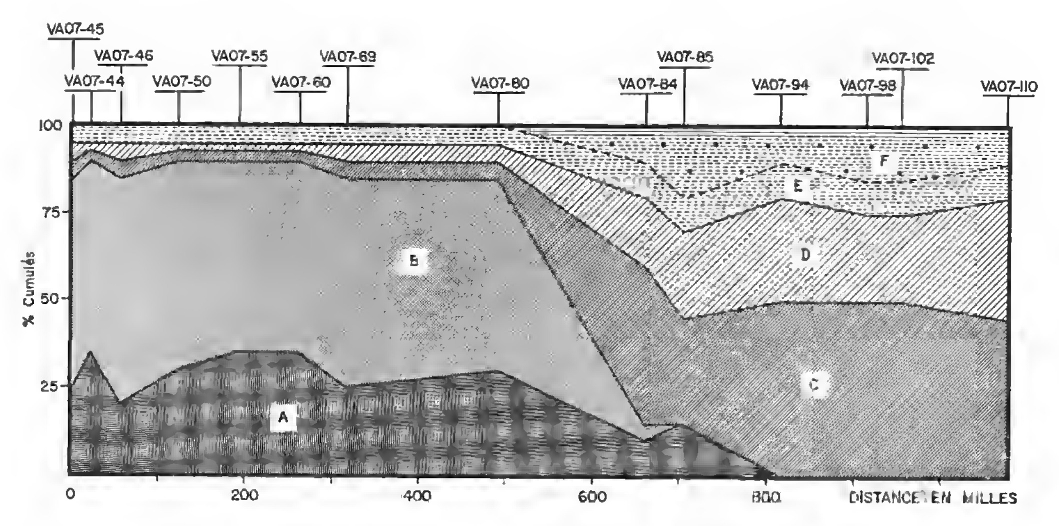


Fig. 6. — Constituants majeurs des sédiments de surface (profil W-E).
A : Foraminifères ; B : Nannofossiles calcaires ; C : Diatomées ;
D : Radiolaires ; E : argiles ; F : oxydes métalliques.

sation depth » des auteurs anglo-saxons, n'est qu'une profondeur moyenne. En fait, entre la profondeur du début de la dissolution et celle où le calcaire a totalement disparu, il doit exister un passage progressif et continu.

C. — Discontinuités stratigraphiques

Affirmer que la détection des discontinuités stratigraphiques et l'estimation de leur ampleur dépendent de la densité d'échantillonnage de la série, de la précision des échelles biostratigraphiques et de l'usage que l'on en fait est, certes, un truisme. Mais, étant donné l'intérêt que présente le phénomène, il convient de rappeler que l'on ne peut conclure à l'existence d'une discontinuité, notamment lorsqu'elle n'affecte qu'un très bref intervalle de temps, qu'au terme d'une analyse critique des données micropaléontologiques.

Dans le cas présent, l'échelle biostratigraphique selon les Radiolaires est seule applicable à tous les niveaux de diatomites brunes en raison de la dissolution des microfaunes et microflores calcaires. Cette échelle, établie pour la zone équatoriale, a été testée au préalable à l'occasion de l'étude de la carotte MD 73004 (campagne Osiris, 1973), datée avec grande précision par les Foraminifères et la nannoflore.

1. Les lacunes stratigraphiques

Il résulte de l'étude des Radiolaires des carottes de la campagne Transindik que seules les diatomites brunes du bassin Indien central présentent des lacunes de sédimentation. On peut même préciser que, pour VA 07-98, où il manque une zone (R 1 b, voir tabl. I et fig. 7), il s'agit d'une véritable lacune stratigraphique, conformément à la nouvelle définition proposée par Moore à l'occasion du congrès de Kiel (1974).

En tête des carottes VA 07-94 et VA 07-102, respectivement deux et trois biozones ne sont pas représentées, ce qui correspond à des lacunes de sédimentation de l'ordre de 0,4 et 1,1 million d'années environ. Par contre, les carottes VA 07-44 à VA 07-80 ne présentent aucune anomalie: le dépôt des sédiments (boues calcaires) qu'elles contiennent s'étant effectué il y a moins de 0,18 million d'années.

La première conclusion qui s'impose est donc que les fonds du bassin Indien central, le long du profil Transindik, n'ont apparemment pas le même âge et qu'ils sont partiellement constitués par des affleurements de matériaux anciens.

2. Les couches à très faibles taux de sédimentation

Dans les cas examinés ci-dessus, il manque une ou plusieurs biozones et il est donc permis de conclure à l'existence de lacunes stratigraphiques. Cependant, il existe d'autres cas (VA 07-94, VA 07-98) où la succession stratigraphique de plusieurs zones semble normale mais où l'épaisseur des sédiments est anormalement faible. Les taux apparents de sédimentation sont de l'ordre d'un à deux mètres par million d'années. S'il s'agissait de boues rouges, on pourrait penser que ces faibles valeurs sont en relation avec une dissolution extrême : mais ces valeurs sont obtenues ici pour des boues siliceuses. On est donc amené à supposer l'existence de lacunes de sédimentation, non immédiatement perceptibles,

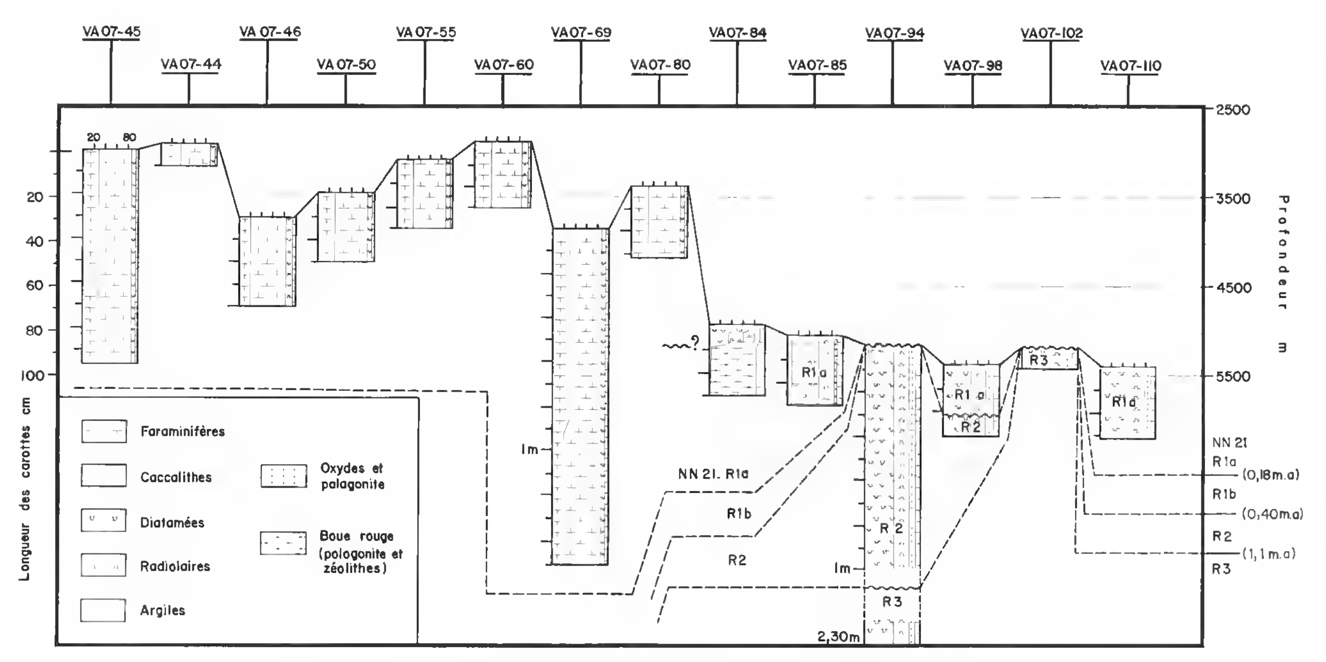


Fig. 7. — Schéma lithologique des carottes de la campagne Transindik.

parce que l'intervalle de temps apparent qu'elles représentent est inférieur à celui des zones biostratigraphiques.

Ces discontinuités stratigraphiques et le phénomène de dissolution des carbonates peuvent expliquer la faible épaisseur des sédiments déposés dans le bassin Indien central (Ewing *et al.*, 1969). Les séries lithologiques ainsi réduites sont encore appelées séries condensées.

D. — Nature et âge des sédiments associés aux nodules de manganèse

Alors qu'il n'est pas rare de rencontrer, dans les boues calcaires, des amas vraisemblablement enrichis en oxyde de fer, voire des micro-nodules, les concrétions de dimension centimétrique sont localisées dans les carottes de diatomites brunes et, plus particulièrement, à leur sommet (cf. les observations faites à bord du « Valdivia »).

On constate que les bancs de nodules échantillonnés au cours de la campagne reposent sur des sédiments d'âges différents, ce qui ne présume, en aucun cas, de leur vitesse de croissance. Dans deux carottes, VA 07-94 et VA 07-102 (fig. 7), ces nodules reposent au voisinage immédiat d'une lacune de sédimentation ou soulignent une lacune stratigraphique. Dans un autre cas, ils sont associés à une couche de sédiment d'épaisseur très réduite (VA 07-98).

Dans la carotte VA 07-84, l'âge du contact entre boues rouges et diatomites brunes est incertain. La biozone NN 21 n'a pas été identifiée et la composition de la microfaune siliceuse (Radiolaires), sans permettre de conclure définitivement, laisse supposer la présence de la zone R 1 b. De bons indices existent donc à nouveau en faveur de la présence d'une lacune de sédimentation. Les boues rouges sont relativement riches en micro-nodules.

Le cas de la carotte VA 07-85 est comparable au précédent. Sans qu'il soit possible de conclure, notamment en raison de la dissolution et des remaniements, il est probable que la base de cette carotte se situe dans les zones NN 20 et R 1 b. C'est à ce niveau que l'on a observé quelques nodules polymétalliques.

Seule la carotte VA 07-110 ne semble pas présenter d' « anomalies » de sédimentation ; il convient de noter qu'un nodule se trouvait à son sommet.

En règle générale, il apparaît que les bancs de nodules échantillonnés dans le bassin Indien central sont étroitement associés à un faciès sédimentaire qui, au moins partiellement, résulte de la dissolution des carbonates. Les boues siliceuses, qui constituent ce faciès, sont, en outre, généralement disposées en séries lithologiques condensées présentant de nombreuses discontinuités stratigraphiques.

V. INTERPRÉTATIONS

A. — Origine des diatomites brunes et des boues rouges

Du point de vue de la sédimentologie, ce qui caractérise la zone équatoriale de l'océan Indien, comme celle du Pacifique, c'est une forte productivité organique au niveau des

grandes discontinuités hydrologiques que sont les divergences nord et sud-équatoriales. Dans l'océan Indien, la divergence sud-équatoriale est sans doute plus importante, à cet égard, que la divergence nord-équatoriale qui est perturbée par la mousson pendant une moitié de l'année.

C'est à ce niveau que sont précipités, en abondance, du carbonate de calcium sous forme de tests de Foraminifères et de Coccolithes, et de la silice à l'état de squelettes de Radiolaires et de frustules de Diatomées. Par des profondeurs moyennes de l'ordre de 2 000 à 3 000 m, on constate que cette productivité équatoriale aboutit à la constitution de sédiments dont la composition s'établit comme suit :

Calcaire : 80 % (Foraminifères, 20 % ; Coccolithes, 60 %)
Silice : 15 % (Diatomées, 10 % ; Radiolaires, 5 %)
Argiles : 5 %

Dans l'ensemble, ces proportions sont respectées, quelle que soit la longitude, tant que la profondeur de dépôt n'est pas supérieure à 3 000 m. On peut considérer que ces proportions sont le reflet, plus ou moins déformé, de la contribution des nannoflores et microfaunes planctoniques à l'édification de la couverture sédimentaire pour toute la zone équatoriale comprise entre le plateau des Mascareignes et la ride du 90e parallèle Est.

Or, on a pu constater que, dans cette même zone, mais par fonds supérieurs à 5 000 m, il ne reste plus que la fraction siliceuse constituée par des Diatomées et des Radiolaires dont les proportions relatives ne semblent pas avoir changé.

Lorsqu'une fraction calcaire subsiste, les particules qui la composent sont fortement corrodées. Cette corrosion témoigne en faveur d'une dissolution dont l'intensité relative semble croître avec la profondeur pour aboutir, finalement, à la disparition totale du carbonate de calcium par des fonds de l'ordre de 5 000 m.

Ces considérations nous amènent à penser que les diatomites brunes de l'océan Indien central, formées sous le système hydrologique équatorial, sont en quelque sorte le résidu de la dissolution des boues calcaires déposées par moindre profondeur. En outre, si pour des raisons encore indéterminées, la silice des diatomites passe à son tour en solution dans les eaux interstitielles par exemple, il est très probable qu'il ne subsiste plus que les constituants des boues rouges. Un phénomène de cette nature est peut-être à l'origine de la superposition diatomites brunes/boues rouges observée dans la carotte VA 07-84. Dans cette hypothèse, les deux faciès peuvent être qualifiés de résiduels : leur développement est étroitement dépendant des phénomènes contrôlant la dissolution de la silice et des carbonates. Cependant, la présence en quantité non négligeable de minéraux authigènes comme la phillipsite (très abondante dans les boues rouges) et d'amas plus ou moins amorphes de composés métallifères ne peut s'expliquer uniquement par une concentration en relation avec le phénomène de dissolution. On serait donc enclin à considérer ces faciès résiduels comme le siège d'une authigenèse très active.

En résumé, les boues rouges et les diatomites brunes résulteraient donc à la fois d'une dissolution plus ou moins poussée du calcaire et de la silice et d'une diagenèse propre aux grands fonds océaniques.

B. — Quelques propriétés des milieux favorables a la croissance des nodules

Les nodules prélevés au cours de la campagne Transindik sont, à l'évidence, associés aux faciès résiduels du bassin Indien central. Ce fait signifie que l'un au moins des facteurs favorables à leur genèse pourrait être la dissolution des carbonates.

Bien que les mécanismes contrôlant ce phénomène soient encore très mal connus, un certain nombre d'observations montrent que, de nos jours, dans l'Atlantique (Berger, 1968) et dans le Pacifique (Edmond *et al.*, 1971), la dissolution des carbonates est peut-être liée à la remontée vers l'Équateur des eaux de fond antarctiques. Ces eaux sont caractérisées par des températures très basses de l'ordre de 0°C et des teneurs en oxygène et gaz carbonique dissous relativement élevées. Elles sont donc potentiellement agressives vis-à-vis du calcaire et, en raison de leur teneur en oxygène dissous, elles doivent aussi être favorables à la précipitation de métaux comme le fer, le manganèse, etc. On n'a pas encore la preuve directe que ce type de circulation méridienne des eaux de fond en provenance de l'Antarctique affecte le bassin Indien central. Cependant, une circulation analogue a été mise en évidence dans le bassin des Mascareignes (Warren, 1974) et tout porte à croire qu'elle se fait aussi sentir dans d'autres bassins (Leclaire, 1974).

Les faciès résiduels du bassin Indien central présentent la particularité d'être diposés en séries condensées à lacunes de sédimentation. Ces lacunes semblent le plus souvent assimilables à des lacunes stratigraphiques. L'origine supposée de ces discontinuités stratigraphiques est l'érosion localisée et intermittente des dépôts par les courants de fond. Cette hypothèse est basée sur des travaux très récents portant sur le Pacifique, notamment ceux de C. D. Hollister *et al.* (1974).

Quelle est la relation entre ces courants de fond et la remontée des eaux antarctiques ? Les deux phénomènes semblent être liés, de nos jours, dans le Pacifique. On présume qu'il en est de même dans l'océan Indien central.

Ainsi, les nodules semblent particulièrement abondants au sein de milieux où dissolution et érosion réduisent le volume des dépôts de matériaux et amincissent les couches préalablement déposées. En définitive, ces deux phénomènes, là où ils existent, concourent à maintenir pendant plus longtemps qu'ailleurs des particules (germes ?) en contact avec l'interface eau/sédiment.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Berger, W. H., 1968. — Planktonic Foraminifera : selective solution and paleoclimatic interpretation. *Deep Sea Res.*, **15** : 31-43.

Berggren, W. A., 1972. — A Cenozoic time-scale — Some implications for regional geology and paleobiogeography. *Lethaïa*, **5** : 195-215.

— 1973. — The Pliocene time-scale : calibration of planktonic Foraminiferal and calcareous nannoplankton zones. *Nature*, **243** (5407) : 391-397.

Edmond, J. M., Y. Chung and J. G. Sclater, 1971. — Pacific Bottom Water, penetration around Hawaï. *J. Geophys. Res.*, **76** (33) : 8089-8097.

HAYS, J. D., 1965. — Radiolaria and late Tertiary and Quaternary history of Antarctic seas. *Antarctic Res. Ser. Am. Geophys. Union*, **5** : 125-184.

HOLLISTER, C. D., D. A. JOHNSON and P. F. LONSDALE, 1974. — Current-controlled abyssal sedimentation : Samoan passage, equatorial west Pacific. *J. of Geol.*, **82** (3) : 275-300.

LECLAIRE, L., 1974. — Late cretaceous and cenozoic pelagic deposits — Paleoenvironment and paleooceanography of the central western Indian ocean. *In* : Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, vol. XXV, Washington (U. S. Government Printing Office) : 481-512.

MARTINI, E., and T. WORSLEY, 1970. — Standard Neogene calcareous nannoplankton zonation. *Nature*, **225** (5229) : 289-290.

MC INTYRE, A., and R. MC INTYRE, 1971. — Coccoliths concentrations and differential solution in oceanic sediments. *In* : The Micropaleontology of the Oceans, B. M. Funnel et W. R. Riedel ed., Cambridge Univ. Press : 253-261.

MC KENZIE, D. P., and J. G. SCLATER, 1973. — The evolution of the Indian ocean. *Scient. Am.*, **228** (5) : 62-72.

MOORE, T. C., 1974. — Pacific cenozoic hiatuses and erosion. *In* : 3rd Planktonic Conference, Kiel (*sous presse*).

NIGRINI, C. A., 1971. — Radiolarian zones in the quaternary of the equatorial Pacific ocean. *In* : The Micropaleontology of the Oceans, B. M. Funnel et W. R. Riedel ed., Cambridge Univ. Press : 443-461.

OLAUSSON, E., 1971. — Quaternary correlations and geochemistry of oozes. *In* : The Micropaleontology of the Oceans, B. M. Funnel et W. R. Riedel ed., Cambridge Univ. Press : 375-389.

PARKER, F. L., and W. H. BERGER, 1971. — Faunal and solution patterns of planktonic Foraminifera in surface sediments of the South Pacific. *Deep Sea Res.*, **18** : 73-107.

PETRUSHEVSKAYA, M. G., 1972. — Biostratigraphy of deep-sea quaternary sediments based on the radiolarian analysis data. *Okeanologia*, **12** (1) : 17-86.

RIEDEL, W. R., and A. SANFILIPPO, 1970. — Radiolaria, Leg 4, Deep Sea Drilling Project. *In* : Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, vol. IV, Washington (U. S. Government Printing Office) : 503-575.

SCLATER, J. G., and R. L. FISHER, 1974. — Evolution of the East-Central Indian ocean, with emphasis on the tectonic setting of the Ninetyeast Ridge. *Bull. geol. Soc. Am.*, **85** (5) : 683-702.

SEGOUFIN, J., et L. LECLAIRE, 1975. — Étude des paléo-environnements marins par l'analyse factorielle des populations de Foraminifères planctoniques. *Bull. du B.R.G.M.*, 2e sér., sect. IV, nº 3 : 175-200.

WARREN, B. A., 1974. — Deep flow in the Madagascar and Mascarene basins. *Deep Sea Res.*, **21** : 1-21.

WHITMARSH, R. B., O. E. WESER *et al.*, 1974. — *In* : Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, vol. XXIII, Washington (U. S. Government Printing Office).

Manuscrit déposé le 10 septembre 1975.

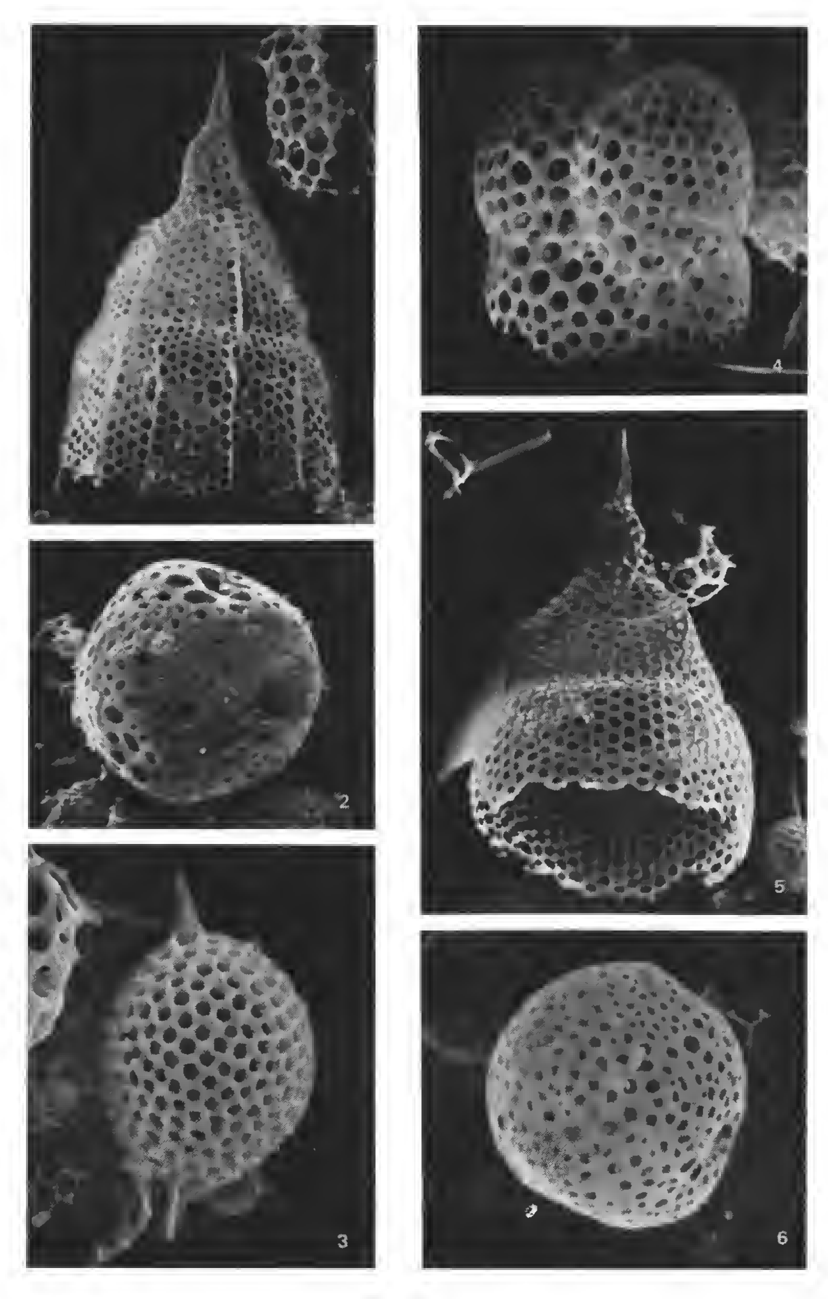


PLANCHE I

1. — *Pterocorys hertwigii* (Haeckel) Petrushevskaya. Électaomicrographie J. C. nº 775 × 530.
2. — *Buccinosphaera invaginata* (Haeckel). Électromicrographie J. C. nº 740 × 590.
3. — *Stylatractus universus* (Hays). Électromicrographie J. C. nº 3 983 × 840.
4. — *Desmopyris stabiloides* (Petrushevskaya). Électromicrographie J. C. nº 4 305 × 980.
5. — *Pterocorys campanula* (Haeckel). Électromicrographie J. C. nº 4 319 × 560.
6. — *Collosphaera tuberosa* (Haeckel). Électromicrographie J. C. nº 807 × 620.

PLANCHE II

1. — *Gephyrocapsa oceanica* (Kamptner). a, spécimen pratiquement intact, seule la grille centrale est brisée. × 20 000 env. Électromicrographie M. C. n° 1 976 ; b, dissolution assez avancée. × 13 500 env. Électromicrographie M. C. n° 3 555 ; c, dissolution très poussée, l'espèce devient difficilement reconnaissable. × 13 500 env. Électromicrographie M. C. n° 3 556.
2. — *Emiliania huxleyi* (Lohmann). Individu partiellement dissous. × 18 000 env. Électromicrographie M. C. n° 3 460.
3. — *Cyclococcolithus leptoporus* (Murray et Blackmann). a, spécimen intact. × 8 200 env. Électromicrographie P.-J. G. n° 11 ; b, exemple de dissolution très avancée. × 10 800 env. Électromicrographie M. C. n° 3 553.

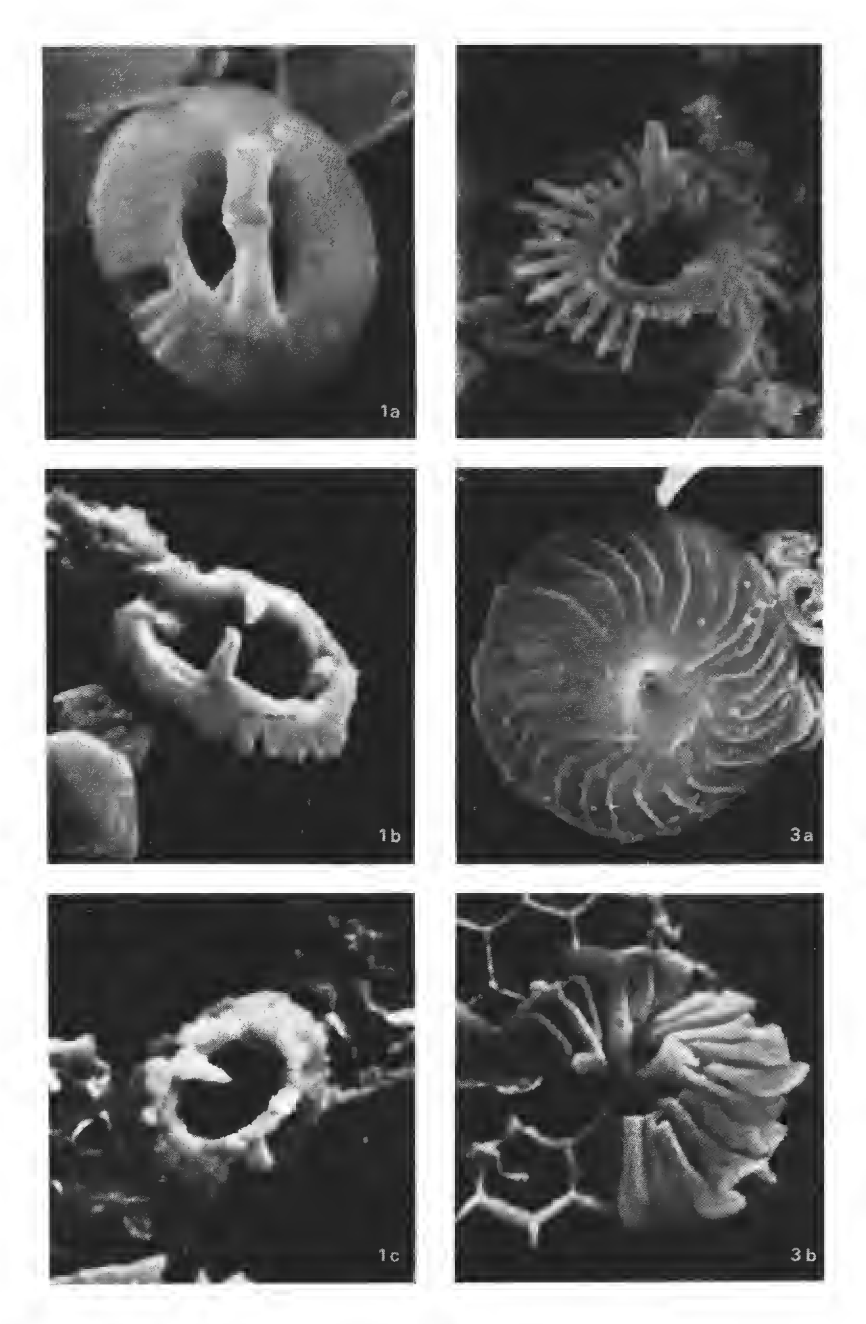


PLANCHE II

Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris, 3e sér., nº 396, juillet-août 1976,
Sciences de la Terre 55 : 241-268.

Achevé d'imprimer le 30 décembre 1976.

IMPRIMERIE NATIONALE

6 564 003 5

Recommandations aux auteurs

Les articles à publier doivent être adressés directement au Secrétariat du *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle*, 57, rue Cuvier, 75005 Paris. Ils seront accompagnés d'un résumé en une ou plusieurs langues. L'adresse du Laboratoire dans lequel le travail a été effectué figurera sur la première page, en note infrapaginale.

Le *texte* doit être dactylographié à double interligne, avec une marge suffisante, recto seulement. Pas de mots en majuscules, pas de soulignages (à l'exception des noms de genres et d'espèces soulignés d'un trait).

Il convient de numéroter les *tableaux* et de leur donner un titre ; les tableaux compliqués devront être préparés de façon à pouvoir être clichés comme une figure.

Les *références bibliographiques* apparaîtront selon les modèles suivants :

Bauchot, M.-L., J. Daget, J.-C. Hureau et Th. Monod, 1970. — Le problème des « auteurs secondaires » en taxionomie. *Bull. Mus. Hist. nat., Paris*, 2e sér., 42 (2) : 301-304.

Tinbergen, N., 1952. — The study of instinct. Oxford, Clarendon Press, 228 p.

Les *dessins* et *cartes* doivent être faits sur bristol blanc ou calque, à l'encre de chine. Envoyer les originaux. Les *photographies* seront le plus nettes possible, sur papier brillant, et normalement contrastées. L'emplacement des figures sera indiqué dans la marge et les légendes seront regroupées à la fin du texte, sur un feuillet séparé.

Un auteur ne pourra publier plus de 100 pages imprimées par an dans le *Bulletin*, en une ou plusieurs fois.

Une seule épreuve sera envoyée à l'auteur qui devra la retourner dans les quatre jours au Secrétariat, avec son manuscrit. Les « corrections d'auteurs » (modifications ou additions de texte) trop nombreuses, et non justifiées par une information de dernière heure, pourront être facturées aux auteurs.

Ceux-ci recevront gratuitement 50 exemplaires imprimés de leur travail. Ils pourront obtenir à leur frais des fascicules supplémentaires en s'adressant à la Bibliothèque centrale du Muséum : 38, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris.


MUSEUM
NATIONAL
D'HIST. NAT.